

Trabajo Fin de Grado

Cargador inalámbrico para patinete eléctrico

Wireless charger for electric scooter

Autor/es

Eusebiu Galatanu

Director/es

Dr. Juan Luis Villa Gazulla

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2019

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	2
ÍNDICE DE TABLAS	4
1 INTRODUCCION	5
2 OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO	6
3 ESTADO DEL ARTE	7
4 DESAROLLO DEL PROYECTO	9
4.1 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTROMAGNETICO	9
4.1.1 Conceptos Básicos del Sistema WPT	9
4.1.2 Topologías	12
4.1.3 Topología SS	13
4.1.4 Definición de Parámetros y Obtención de la Topología Óptima	17
4.2 DISEÑO DEL SOPORTE	20
4.3 DISEÑO DE SISTEMA DE ALIMENTACION	22
4.3.1 Elección del sistema de alimentación	22
4.3.2 Fabricación del sistema de alimentación	23
4.4 SISTEMA DE TRANSFERENCIA CONSTRUIDO	29
4.4.1 Bobinas	29
4.4.2 Condensadores	32
4.5 PRUEBAS EXPERIMENTALES	34
4.5.1 BARRIDO EN FRECUENCIA	35
4.5.2 BARRIDO EN TENSION	36
5 CONCLUSIONES	39
6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. *Ninebo One E [1]*

Figura 2. *Circuito equivalente de un sistema WPT alimentando una carga resistiva [4]*

Figura 3. *Acoplamiento y dispersión de las líneas de campo*

Figura 4. *Tipos básicos de compensaciones [4]*

Figura 5. *Circuito equivalente de un WPT con topología SS[4]*

Figura 6. *Simulación sistema Simulink*

Figura 7. *V1 e I1 salida del inversor*

Figura 8. *V2 e I2 después del puente rectificador*

Figura 9. *Circuito eléctrico sistema SS*

Figura 10. *Soporte fabricado en XPS*

Figura 11. *Diseño 3D inicial*

Figura 12. *Diseño 3D final optimizado*

Figura 13. *Proceso de impresión*

Figura 14. *Puente monofásico de onda Completa [4]*

Figura 15. *Circuito electrónico puente en H*

Figura 16. *Señales A y B salida Controlador*

Figura 17. *Placa fotosensible*

Figura 18. *Fotolito con pistas impresas / Máquina insoladora*

Figura 19. *Proceso de revelado y atacado*

Figura 20. *Proceso de mecanizado*

Figura 21. *Proceso de soldadura de los componentes*

Figura 22. *Placa terminada*

Figura 23. *Autotransformador monofásico / Fuente de tensión DC*

Figura 24. *Bus de continua (amarillo) – Tensión de salida (verde) – Señal disparo IGBT (morado) – Intensidad salida (azul)*

Figura 25. *Patinete escalado*

Figura 26. *Bobinas primario y secundario construidas*

Figura 27. *Resultados Wayne Ker*

Figura 28. *Montaje medición L y R bobinas*

Figura 29. *Condensadores primario*

Figura 30. *Condensadores secundario*

Figura 31. *Resistencias de carga*

Figura 32. *Sistema completo montado*

Figura 33. *Grafica Tensión primario y secundario*

Figura 34. *Grafica Intensidad primario y secundario*

Figura 35. *Grafica potencia (W) / Tensión primario (V)*

Figura 36. *Señales tensión-intensidad del primario y secundario*

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. *Valores teóricos de diseño*

Tabla 2. *Parámetros eléctricos simulados*

Tabla 3. *Valores bobinas construidas*

Tabla 4. *Valores teóricos condensadores*

Tabla 5. *Comparación parámetros a diferentes frecuencias*

Tabla 6. *Resultados barrido de tensión*

1 INTRODUCCION

Desde hace mucho tiempo la electricidad forma parte de nuestras vidas, ilumina nuestros hogares, ha permitido el desarrollo de la industria tal como la conocemos hoy en días y ha marcado una diferencia en el transporte de personas y mercancías.

Al tratarse de una energía limpia, sobre todo si nos basamos en el momento de su utilización y no en el de su generación, cada vez está tomando más importancia en nuestra sociedad, la cual está concienciada cada vez más con el medio ambiente y el cambio climático. Es por ello que cada vez podemos ver más movilidad eléctrica entre nosotros.

La movilidad eléctrica presenta muchas ventajas, entre ellas la alta eficiencia de sus motores y el poco mantenimiento que se necesita si los comparamos con los de combustión. En su contra tenemos el mayor de sus inconvenientes, el almacenamiento de energía. Las baterías van mejorando día a día, pero aún estamos lejos de alcanzar la autonomía que da un vehículo con motor térmico.

Además de los vehículos eléctricos hoy en día estamos viendo un gran auge en la movilidad eléctrica urbana con la aparición y comercialización de todo tipo de patinetes eléctricos, que a diferencia de los vehículos eléctricos son mucho más accesibles a todas las personas.

Este es el punto de partida del trabajo que aquí se presenta: Cargador inalámbrico para patinete eléctrico. Partiendo del gran auge de este tipo de vehículos veo la necesidad de añadir una mejora, ya usada en otros campos, a este tipo de vehículos. Hasta ahora para poder cargarlos era necesario conectarlo mediante un cable al cargador, pero, ¿Por qué no hacer que solo con apoyarlo sobre una base que a su vez le sirve de sustento ya se cargue?

El proyecto va precedido por un apartado dedicado al Estado del Arte sobre los sistemas de carga inalámbrica y se cierra con un apartado de conclusiones donde se realiza una reflexión acerca de los problemas y retos enfrentados a la hora de al llevar a cabo este proyecto, así como las ventajas, limitaciones y las futuras posibilidades.

2 OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO

El tema que se aborda en el siguiente proyecto es la realización del diseño, montaje y puesta en marcha de un cargador inalámbrico para la carga de un patinete eléctrico, concretamente para el Ninebot One E.



Figura 1. *Ninebot One E [1]*

Se trata de un patinete de una sola rueda el cual acelera y frena mediante la inclinación del cuerpo del conductor hacia adelante o hacia atrás. A pesar de ser un sistema muy novedoso y llamativo en cuanto a estética y funcionalidad, sigue usando el clásico cargador eléctrico mediante cable, el cual además del inconveniente de tener que conectarlo, le afecta la suciedad, el polvo, el agua o los productos químicos.

Es por ello que hemos pensado añadirle una innovación más a este producto, la carga inalámbrica, que además de lo mencionado anteriormente, evita los riesgos derivados del contacto eléctrico como chispazos, cortocircuitos o contactos directos.

Para ello, utilizaremos una modelización del sistema teórico en MatLab que posteriormente fabricaremos e implantaremos en un soporte modelado en 3D.

Así, los objetivos básicos del proyecto son:

- Aprender a diseñar un sistema de 2 bobinas acopladas magnéticamente a través del aire y encontrar el óptimo
- Diseñar y realizar el montaje de la parte mecánica del cargador
- Diseñar y realizar el montaje de la parte eléctrica del cargador
- Pruebas y puesta en marcha

El objetivo secundario sería el del control de carga de la batería. Las baterías son muy sensibles y hay que realizar la carga de forma controlada y mediante unas curvas específicas en función del tipo de cada una. Dicho sistema de control de carga excede con creces el alcance de un trabajo de fin de grado, por lo que el fin será el de traspaso de potencia entre el soporte (primario) y el patinete (secundario) dejando la puerta abierta a que futuras investigaciones puedan continuar con el estudio e implementación del sistema de regulación de carga.

3 ESTADO DEL ARTE

En una era en la que lo inalámbrico parece ser la norma, desde los teléfonos móviles a las conexiones Wifi, la idea de transferir electricidad inalámbricamente no parece salirse de lugar, es más, se está convirtiendo en una exigencia en los productos nuevos. Actualmente podemos encontrar esta tecnología implantada en infinidad de productos como: cepillos de dientes, teléfonos móviles, portátiles, relojes inteligentes, etc.

Cuántas veces nos ha pasado de no poner a cargar el móvil por pereza y después nos ha hecho falta por algún imprevisto y no hemos tenido la batería necesaria. Con este sistema es tan fácil como dejarlo encima de una superficie y este se carga automáticamente. Ya hay vehículos que incorporan este sistema para cargar los dispositivos móviles que con dejarlo en la zona específica para ello, el móvil ya se carga.

Además de la ventaja evidente de no tener que coger el cable y conectarlo tiene otras ventajas añadidas como que el conector y la clavija no se dañan o que el cargador es universal para todos los móviles independientemente de que tipo de conector tengan.

A esta carga inalámbrica habría que llamarla carga por inducción o carga electromagnética, porque ese es su funcionamiento básico. El sistema es muy sencillo, dentro de la complejidad de su desarrollo y ejecución. Básicamente, consiste en generar un campo electromagnético y emisor de energía, y lograr captar la energía en el otro extremo. El campo electromagnético lo genera el primario del sistema y lo recibe el secundario, el cual está implementado en el receptor que queremos cargar.

La idea de la electricidad inalámbrica no es nueva. Para saber su procedencia debemos remontarnos 130 años atrás donde Nikola Tesla ya había estudiado y diseñado una manera de transmitir la energía de una torre hacia otra sin necesidad de ninguna cable, una idea que actualmente se ha adaptado para darnos los actuales cargadores inalámbricos.

Si bien es cierto que donde más profundamente está instaurado es en los productos electrónicos, cada vez se ven más sistemas de potencia que se alimentan mediante este sistema. Por ejemplo, en el caso los vehículos eléctricos, Suecia está trabajando en la electrificación de sus carreteras mediante una solución de recarga inductiva para coches eléctricos a través del asfalto. El objetivo es desarrollar una infraestructura de recarga sin cables que permita a los vehículos eléctricos recuperar autonomía mientras circulan a lo largo de 2.000 kilómetros de carreteras. Otro ejemplo del gran avance que está teniendo este sistema, es el que se ha conseguido en el DOE (Departamento de Energía de Estados Unidos). Han creado con éxito un prototipo funcional de un sistema de carga inalámbrica capaz de transmitir 120kW de potencia con un 97% de eficiencia [2].



En los ejemplos anteriores podemos ver los dos tipos de carga: el primero se trata de un sistema de carga dinámico, ya que la parte que emite la energía (la carretera) está estática y la parte que la recibe (el vehículo) se desplaza; En cambio, el segundo se trata de un sistema de carga estático ya que las dos partes, tanto el emisor como el receptor, están en una posición fija durante la transferencia de energía.

Aún sin llegar a cuajar y convertirse en un estándar capaz de abarcar todas las necesidades del mercado, la carga inalámbrica lleva bastantes años entre nosotros, y cada vez son más las marcas que deciden sumarse a la tendencia de añadir esta tecnología a sus productos. Al fin y al cabo, si el objetivo es llegar a un futuro totalmente “sin cables”, adoptar la carga inalámbrica es algo que la mayoría, sino todos los fabricantes, deberían llevar a cabo tarde o temprano e implementar en sus productos.

4 DESAROLLO DEL PROYECTO

A continuación, se va a exponer el marco teórico del proyecto. Usando distintas fuentes bibliográficas, a partir de las cuales se conoce en profundidad el sistema que nos ocupa, así como la tecnología empleada.

El comienzo del trabajo data aproximadamente del 4 de abril de 2019, fecha de aprobación de la propuesta. Todo empieza con la simulación del sistema en Matlab obteniendo como resultado los parámetros necesarios para construir el prototipo.

La primera fase fue la adquisición de los materiales necesarios tales como el hilo de Litz, que al tratarse de una sección y características concretas fue bastante costoso encontrarlo. En esta fase también se creó el prototipo del soporte del patinete en XPS. Este paso era importante ya que era el que nos iba a mantener a la distancia deseada el primario y el secundario del sistema.

En la segunda fase nos centramos en la parte de los circuitos electrónicos. Empezamos creando la fuente de alimentación desde cero y continuamos con la placa del secundario.

Para finalizar realizamos pruebas experimentales a los equipos por separado y finalmente a todo el conjunto obteniendo un resultado bastante bueno siendo que habíamos creado el prototipo desde cero.

4.1 DISEÑO DEL SISTEMA ELECTROMAGNETICO

4.1.1 Conceptos Básicos del Sistema WPT

Se denomina WPT (Wireless Power Transfer) a los sistemas de transferencia de potencia por medio inalámbrico, con una elevada eficiencia, a elevadas distancias y mediante acoplamiento inductivo [3].

Este sistema de alimentación eléctrica inalámbricamente tiene muchas ventajas con respecto a los sistemas tradicionales de alimentación mediante cables, ya que no les afecta la suciedad, la humedad, el polvo o los productos químicos. Además evitan los riesgos derivados del contacto eléctrico como chispazos, cortocircuitos o contactos directos. Se pueden considerar, a su vez, más robustos ya que no existen piezas mecánicas que deban ser conectadas entre el cargador y la carga.

La siguiente figura muestra el circuito eléctrico equivalente de dos bobinas acopladas magnéticamente. La primera de ellas alimentada a través de una fuente de tensión senoidal de valor eficaz V_1 y con una pulsación ω , y la segunda alimentando una carga puramente resistiva.

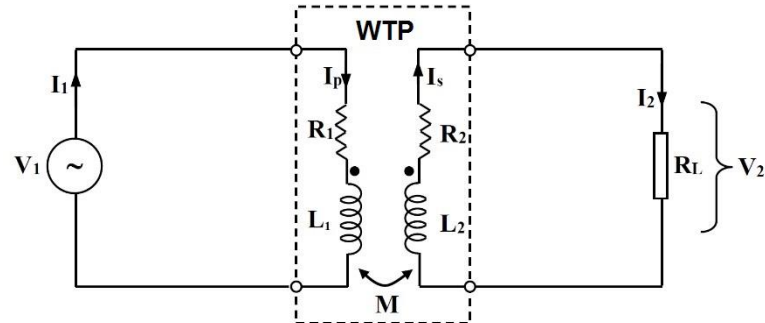


Figura 2. Circuito equivalente de un sistema WPT alimentando una carga resistiva [4]

Una carga en movimiento genera un campo magnético [5]. Este campo magnético se rige por la ecuación 4.1.

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{|q|v \sin\phi}{r^2} \quad (4.1)$$

B :Campo magnético

ϕ :Angulo entre l y r .

μ_0 :Permeabilidad magnética en el vacío

v :Velocidad de la carga

r :Distancia a la carga

q :Carga eléctrica

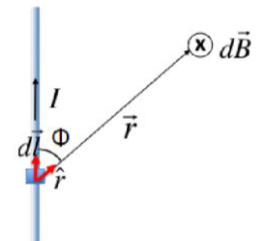
Si aplicamos la ecuación 4.1 a un conductor infinito y recto, el campo magnético resultante vendría dado por la ecuación 4.2.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \quad (4.2)$$

I : Intensidad

l : Longitud del conductor

\hat{r} : Vector unitario del vector de posición

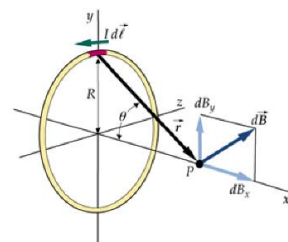


Al haber una corriente eléctrica en una bobina, se genera un campo magnético. En el caso de que la corriente que circula por el conductor sea variable, el campo magnético también lo será. En nuestro caso, una bobina circular, el campo vendrá determinado por la ecuación 4.3.

$$B_x = \frac{\mu_0 I y^2}{2(x^2 + y^2)^{3/2}} \quad (4.3)$$

x: Eje de la bobina

y: Eje transversal de la bobina



En cuanto a la bobina receptora, esta sufre una inducción electromagnética, posible si el campo magnético generado por la bobina del primario es variable. Esto es debido a la ley de Faraday, la cual establece que la corriente inducida es proporcional a la variación del flujo magnético. En la práctica no es del todo así debido a que las bobinas están a una cierta distancia y que el medio de transmisión es aire. Esto produce que no todas las líneas de campo que genera la bobina transmisora pasen por la receptora (Figura 3.)

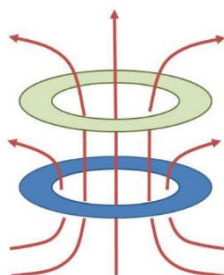


Figura 3. Acoplamiento y dispersión de las líneas de campo

La calidad de la transmisión de energía dependerá de la cantidad de líneas de campo magnético que atraviese la bobina receptora. Para aumentar su número podemos aumentar el diámetro de las bobinas, acercarlas o alinearlas mejor. También podremos aumentar la intensidad de campo magnético o la frecuencia a la que es transmitido. Todos los parámetros descritos se verán limitados por la aplicación que se le dé al sistema, ya que tendrá unas medidas y unas intensidades nominales concretas.

A las bobinas acopladas se las puede comparar con un transformador, con la diferencia de que los parámetros de inductancia mutua e inductancia de dispersión son muy diferentes a los que posee un transformador con núcleo de ferrita perfectamente acoplado. La intensidad necesaria para magnetizar el aire es muy superior a la necesaria para magnetizar un núcleo de ferrita.

Las grandes distancias que puede haber entre las bobinas provoca que el factor de acoplamiento sea muy inferior a la unidad, producto de ello da lugar a bobinas “Débilmente Acopladas”. Para solventar este problema es necesario trabajar a altas frecuencias y en resonancia y así contrarrestar los flujos dispersos y el bajo coeficiente de inducción mutua.

4.1.2 Topologías

Como hemos explicado previamente, hay que trabajar a altas frecuencias para poder realizar la transferencia de energía, pero además de ello, para poder transferir la máxima potencia posible es necesario hacer trabajar al sistema en resonancia. Para hacer esto posible, hay que sintonizar el circuito de secundario a la frecuencia de trabajo hasta que obtengamos esta característica. Por otra parte, para crear el campo magnético se necesita absorber mucha energía reactiva de la fuente, por lo que para compensar esto y absorber solo los W que necesita la carga es usual hacer trabajar al primario también en resonancia añadiendo al circuito un condensador de compensación.

Las diferentes topologías que nos podemos encontrar las podremos obtener en función de la conexión de los condensadores de compensación de ambos devanados.

A continuación se van a ilustrar las cuatro más comunes en función de la conexión de los condensadores de compensación en ambos devanados.

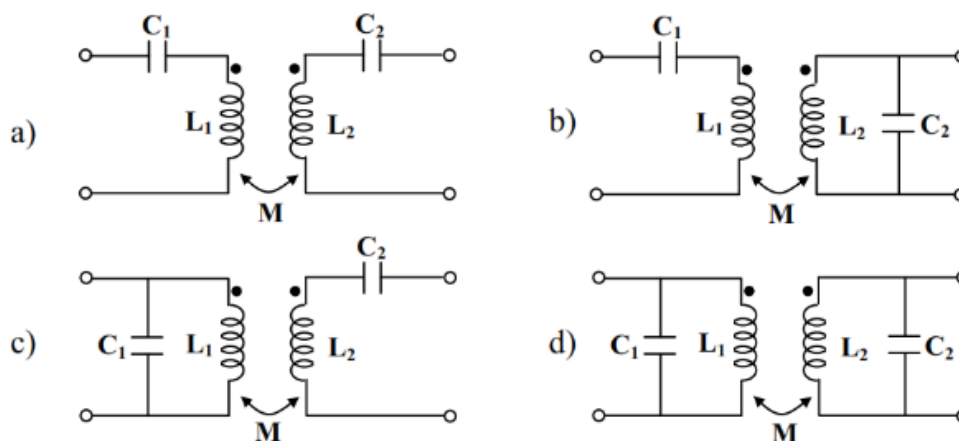


Figura 4. Tipos básicos de compensaciones [4]

- a) Serie-Serie (SS): El condensador C_1 y el C_2 están en serie con sus respectivas bobinas.
- b) Serie-Paralelo (SP): El condensador C_1 está en serie con la bobina del primario y C_2 está en paralelo con la bobina del secundario.
- c) Paralelo- Serie (PS): El condensador C_2 está en serie con la bobina del primario y C_1 está en paralelo con la bobina del secundario.
- d) Paralelo-Paralelo (PP): El condensador C_1 está en paralelo con la bobina del primario y C_2 está en paralelo con la bobina del secundario.

Las diversas topologías presentan diferentes comportamientos frente a la variación de los parámetros. Por ejemplo, los sistemas con compensación serie en secundario se comportan como fuente de tensión y los sistemas con compensación paralelo en secundario como fuente de corriente. Otro ejemplo es que los condensadores de resonancia en compensación serie se verán sometidos a elevadas tensiones mientras que en paralelo, se verán sometidos a elevadas corrientes para la misma potencia a transferir y mismas tensiones de alimentación y en la carga.

4.1.3 Topología SS

En el presente trabajo se va a estudiar únicamente la topología SS en la cual tanto los condensadores del primario como los del secundario están en serie con sus respectivas bobinas. El sistema SS será el que se va a utilizar para la realización del proyecto ya que es el que más se ajusta a las necesidades. La topología SS es la que presenta un diseño más sencillo, tiene carácter de fuente de corriente, lo cual es bueno para cargador de baterías y la frecuencia de resonancia no se ve afectada por la variación de la carga. Su principal desventaja es que en caso de mal alineamiento entre bobinas, el consumo de corriente por el primario es elevadísimo y debe ser rápidamente controlado.

Este no es un problema para el caso que nos ocupa, ya que la posición entre bobinas y distancia está perfectamente fijada mecánicamente por el soporte de plástico.

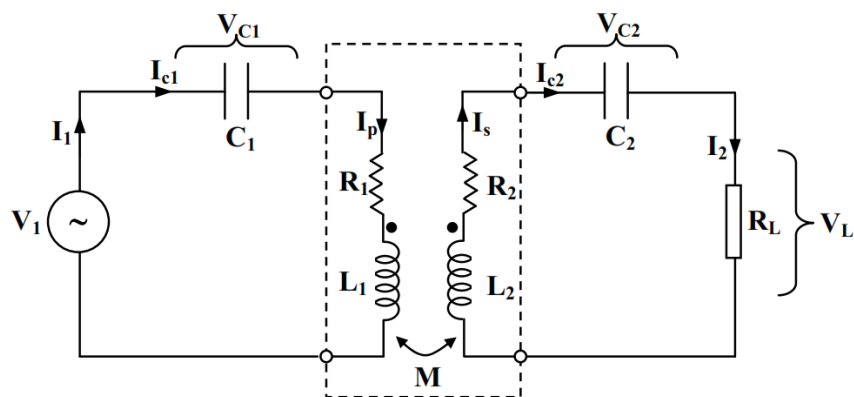


Figura 5. Circuito equivalente de un WPT con topología SS [4]

El devanado primario se alimenta a través de una fuente de tensión senoidal de valor eficaz V_1 y con una pulsación ω , por su parte el secundario alimenta una carga puramente resistiva.

La máxima potencia activa transferida en un sistema WTP, trabajando en resonancia en el circuito secundario consiguiendo que la corriente se encuentre en fase con la tensión ($\cos\phi_2=1$) y la máxima potencia activa transferida viene determinada por:

$$P_{2max} = \frac{\omega M^2 I_p^2 q_s}{L_2} \quad (1)$$

Donde:

ω	= Pulsación de trabajo.
q_s	= Factor de calidad del secundario.
M	= Coeficiente de inducción mutua entre bobinas.
I_p	= Corriente por el devanado primario.
L_2	= Coeficiente de autoinducción del devanado secundario.

El factor de calidad del secundario (q_s) se debe a la inclusión en el lado secundario de condensadores, con el fin de trabajar en resonancia e incrementar así la potencia transferida. El factor de calidad q_s es introducido por Stileau and Covic [6] en su propuesta de un método general para sistemas con núcleo magnético de ferrita. Resulta de la relación entre la potencia reactiva y la activa en el circuito de secundario:

$$q_s = \frac{VAr_s}{P_2} \quad (2)$$

Con el objetivo de que la corriente absorbida de la fuente sea la menor posible y que las pérdidas de conmutación del convertidor de potencia se minimicen es necesario que la impedancia total vista desde la fuente presente carácter óhmico. Por ello se ha de compensar también en el primario; por tanto, se debe trabajar en resonancia en ambos circuitos. Para poder conseguirlo son necesarios condensadores de compensación en ambos devanados, dando lugar en el caso de estudio a la compensación SS.

La frecuencia a la que debe trabajar es uno de los principales y más importantes parámetros a determinar a la hora de diseñar el acoplamiento inductivo. A partir de ella se obtendrán los condensadores de compensación.

Las ecuaciones son:

$$\bar{V}_1 = \left[R_1 + j \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega} \right) \right] \bar{I}_1 - j \omega M \bar{I}_2 = (R_1 + j X_1) \bar{I}_1 - j \omega M \bar{I}_2 = \bar{Z}_1 \bar{I}_1 - j \omega M \bar{I}_2 \quad (3)$$

$$0 = \left[(R_2 + R_L) + j \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right) \right] \bar{I}_2 - j \omega M \bar{I}_1 = [(R_2 + R_L) + j X_2] \bar{I}_2 - j \omega M \bar{I}_1 = \bar{Z}_2 \bar{I}_2 - j \omega M \bar{I}_1 \quad (4)$$

La impedancia reflejada en compensación SS viene dada por:

$$\bar{Z}_r = \frac{\omega^2 M^2 (R_L + R_2)}{(R_L + R_2)^2 + (L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega})^2} - j \frac{\omega^2 M^2 (L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega})}{(R_L + R_2)^2 + (L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega})^2} \quad (5)$$

La condición de máxima potencia en la carga cuando la impedancia reflejada es igual a la conjugada de la impedancia del primario, da lugar a:

$$R_1 = \frac{\omega^2 M^2 (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + (L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega})^2} \quad (6)$$

$$(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega}) = \frac{\omega^2 M^2 (L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega})}{(R_2 + R_L)^2 + (L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega})^2} \quad (7)$$

Trabajando en resonancia en primario y secundario:

$$\omega_{op} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (8)$$

Al hacer cero a ambos lados de la igualdad en la ecuación (7) obtenemos las capacidades de compensación de ambos devanados. Una vez tengamos las capacidades podemos sacar la frecuencia de resonancia de potencia óptima de la ecuación (6):

$$\omega_{op} = \frac{\sqrt{R_1 (R_2 + R_L)}}{M} \quad (9)$$

A mayor coeficiente de inducción mutua entre bobinas “M”, menor será la frecuencia óptima. Esto se va a cumplir con todas las compensaciones. Como en la práctica el valor de “M” en el aire es bajo, la frecuencia de resonancia a la que se deberá trabajar será alta. La eficiencia de la transferencia trabajando a esta frecuencia será baja, es por ello que hay que buscar la frecuencia de diseño “ ω_d ” que conlleve el máximo rendimiento. Para ello, definimos la expresión del rendimiento del acoplamiento inductivo con compensación SS:

$$\eta = \frac{R_L I_2^2}{R_L I_2^2 + R_2 I_2^2 + R_1 I_1^2} = \frac{R_L}{R_L + R_2 + R_1 (\frac{I_1}{I_2})^2} \quad (10)$$

De la ec. (4) y trabajando en resonancia se obtiene:

$$\left| \frac{I_1}{I_2} \right| = \frac{(R_2 + R_L)}{\omega_d M} \quad (11)$$

Que sustituyendo en la ec. (10):

$$\eta = \frac{R_L}{R_L + R_2 + R_1 \frac{(R_2 + R_L)^2}{\omega_d^2 M^2}} = \frac{R_L}{(R_L + R_2)(1 + R_1 \frac{(R_2 + R_L)}{\omega_d^2 M^2})} \quad (12)$$

Si en esta expresión trabajamos a una frecuencia que minimice el denominador, el máximo rendimiento se obtiene para la condición:

$$\omega_d \gg \frac{\sqrt{R_1(R_L + R_2)}}{M} \rightarrow \omega_d \gg \omega_{op} \quad (13)$$

Es decir, la frecuencia de trabajo deberá ser mayor que la frecuencia de máxima potencia para trabajar en condición de máximo rendimiento. Se deberá, por tanto, encontrar un factor K_ω que maximice el rendimiento para cada situación de potencia deseada transferir.

$$\omega_d = K_\omega \omega_{op} = K_\omega \frac{\sqrt{R_1(R_L + R_2)}}{M} \quad (14)$$

Una vez encontrada esta frecuencia, el rendimiento vendrá dado por:

$$\eta \cong \frac{R_L}{R_L + R_2} \quad (15)$$

Y si $R_L \gg R_2$, es posible trabajar con rendimientos cercanos a la unidad, como se comprobará posteriormente. Con esta frecuencia de diseño de máximo rendimiento, es sencilla la búsqueda de los condensadores de primario y secundario para trabajar en resonancia a esa frecuencia de diseño aplicando la ec. (8):

$$C_2 = \frac{1}{L_2 \omega_d^2} ; C_1 = \frac{1}{L_1 \omega_d^2} \quad (16)$$

4.1.4 Definición de Parámetros y Obtención de la Topología Óptima

Para el diseño óptimo del sistema de acoplamiento inductivo es necesario seleccionar algunos parámetros, tales como: las dimensiones de la bobinas, su forma, la distancia entre ellas, la tensión que queremos en el secundario, la frecuencia de trabajo, los condensadores de compensación...

Pero en el caso a estudiar alguno de esos parámetros los tenemos fijos o los podemos fijar:

- Bobinas circulares
- Diámetro bobina primario: 0.35m
- Diámetro bobina secundario: 0.35m
- Distancia entre bobinas: 0.02m
- Frecuencia de diseño: 85kHz
- $V_{busDC} = (\sqrt{2} * 230) = 325 \text{ V}$
- $V_{bateria} = 55.5 \text{ V}$
- $P_{bateria} = 120 \text{ W}$

Para realizar la búsqueda de la solución óptima se va a utilizar un método iterativo implantado en MatLab aportado por el director del TFG. Este método usará los datos fijos de partida e irá variando el número de espiras del primario y secundario además de la frecuencia hasta dar con un resultado óptimo.

Introduciendo los parámetros de diseño y considerando una topología de compensación SS obtenemos los resultados reflejados en la siguiente tabla.

	Teórico
N1_S1	54 espiras de 0.3 mm ²
N2_S2	11 espiras de 1.1 mm ²
L1[H]	3.20e-03
L2[H]	113e-6
M[H]	272e-6
C1[F]	1.6e-9
C2[F]	40E-09
Frec.[kHz]	85

Tabla 2. Valores teóricos de diseño

Con estos parámetros de diseño, se comprobó mediante un modelo de SIMULINK que el comportamiento del sistema era el esperado. En él podemos observar bien diferenciadas la parte del primario y la parte del secundario con todos sus componentes

En la siguiente figura se muestra este modelo, en el cual se observa que la tensión en la carga teórica sería de 56 V y una potencia transferida de 120 W.

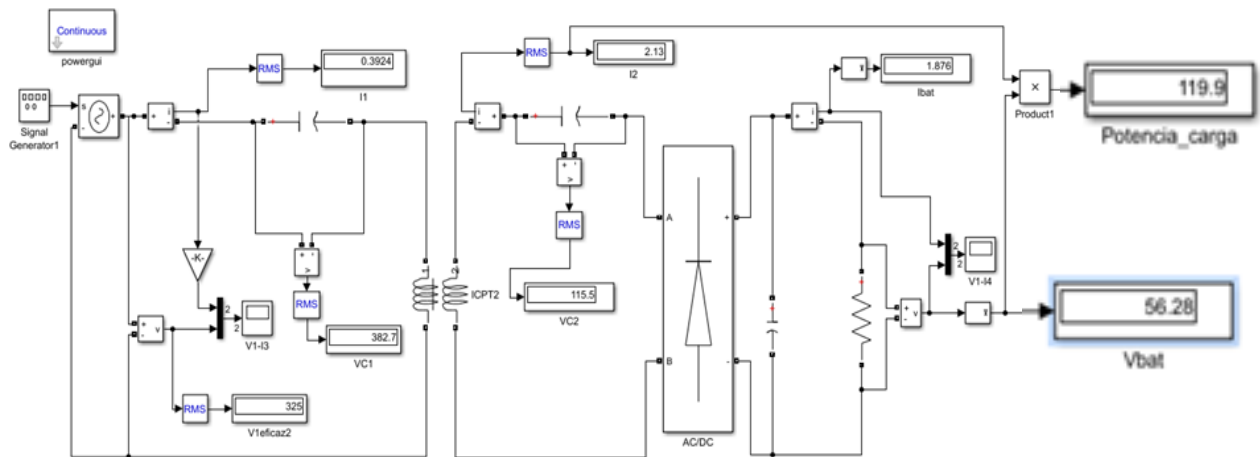


Figura 6. Simulación sistema Simulink

Las formas de onda de tensiones y corrientes se muestran a continuación para poder ser comparadas con los valores reales medidos en el osciloscopio, mostrados más adelante.

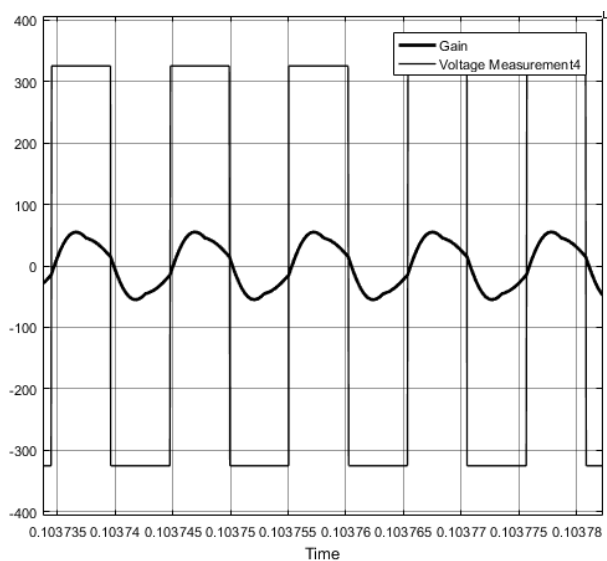


Figura 7. V1 e I1 salida del inversor

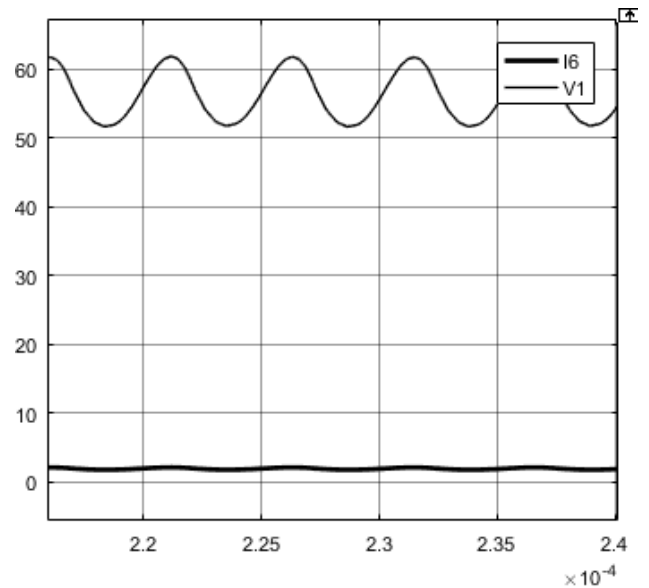


Figura 8. V2 e I2 después del puente rectificador

A la hora de realizar el montaje real del sistema, es fundamental conocer los valores de tensiones y corrientes en los diferentes elementos del circuito para poder seleccionarlos correctamente. En la siguiente tabla se muestran los valores nominales de tensiones y corrientes en los condensadores y bobinas:

Parámetro	Símbolo	Valor
Tensión condensador 1	V_{C1} [V]	380
Tensión condensador 2	V_{C2} [V]	115
Tensión Bobina 1	V_{L1} [V]	370
Tensión Bobina 2	V_{L2} [V]	110
Corriente condensador 1	I_{C1} [A]	0,4
Corriente condensador 2	I_{C2} [A]	1,88
Corriente Bobina 1	I_{L1} [A]	0,4
Corriente Bobina 2	I_{L2} [A]	1,88

Tabla 2. *Parámetros eléctricos simulados*

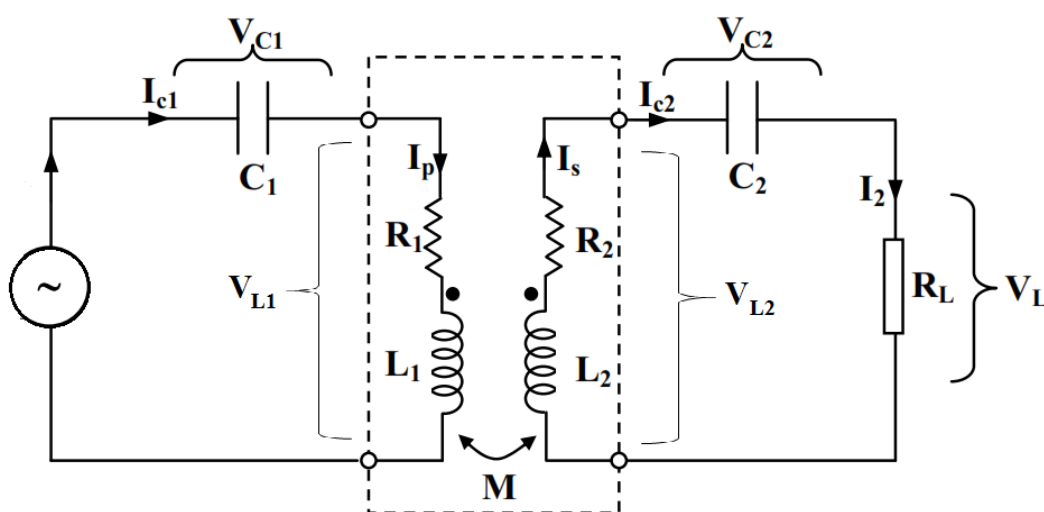


Figura 9. *Circuito eléctrico sistema SS*

Para conseguir el valor exacto de los condensadores con los valores comerciales y que cumplan los valores de tensión adecuados, se han utilizado las siguientes topologías:

C1: Condensador de 2.2 nF en serie con condensador de 6.8 nF = 1.66 nF

C2: 3 condensadores en serie de 120 nF = 40 nF

4.2 DISEÑO DEL SOPORTE

La topología seleccionada (SS) nos impone que el primario y el secundario tienen que estar perfectamente alineados para su correcto funcionamiento. Si esto no se cumple la intensidad que circularía por el primario sería muy elevada lo que podría hacer que el sistema falle.

Una vez obtuvimos todas las características eléctricas necesarias realizando las simulaciones, el siguiente paso antes de empezar a diseñar el sistema de alimentación fue el de fabricar el soporte que nos permitiría que el primario y el secundario del sistema estuvieran alineados.

Para la fabricación del prototipo utilizamos capas de XPS (Poliestireno Extruido) pegadas entre sí con Sikaflex. Elegimos este material ya que es bastante fácil de recortar y modelar, lo que nos permitiría darle la forma necesaria rápidamente, y además es bastante resistente a la compresión aguantando muy bien los 12,5Kg del patinete.



Figura 10. Soporte fabricado en XPS

Tras comprobar que el prototipo en XPS es funcional y se ajusta muy bien, procedimos a realizar el soporte definitivo mediante una impresora 3D. Para ello primero se han traspasado las medidas del prototipo al programa de diseño AutoCad 3D obteniéndose el mismo diseño pero en soporte informático.

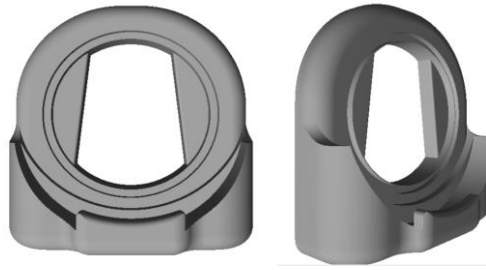


Figura 11. *Diseño 3D inicial*

El material que se usará para su impresión será el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno). Este material se caracteriza por su dureza y su rigidez estructural una vez impreso. Su esfuerzo de tracción a la deformación es de 39MPa lo que nos permite realizar un diseño más delgado y estético lo que además repercutirá directamente en la cantidad de material que se necesita y las horas necesarias para su fabricación.



Figura 12. *Diseño 3D final optimizado*

Para su fabricación se ha utilizado una impresora 3D JGAurora y debido al tamaño total del soporte lo hemos tenido que imprimir en 5 piezas separas para luego unir las mediante un Pen3D utilizando el mismo material, ABS.

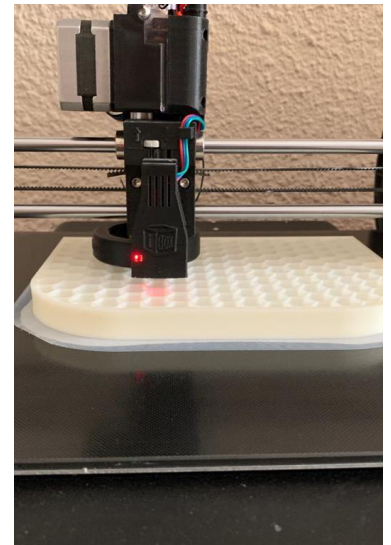
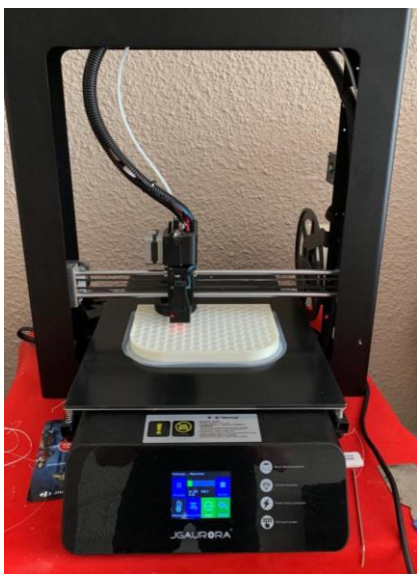


Figura 13. *Proceso de impresión*

4.3 DISEÑO DE SISTEMA DE ALIMENTACION

4.3.1 Elección del sistema de alimentación

La elevada frecuencia a la que tenemos que trabajar, muy superiores a los de la red, hace que los sistemas de carga inalámbrica deban ser alimentados por fuentes de tensión controladas.

Dependiendo del nivel de potencia de queramos transferir se utilizara puentes inversores monofásicos o trifásicos. En nuestro caso utilizaremos un puente monofásico ya que la potencia necesaria es muy pequeña y el cargador será de uso doméstico.

Para la alimentación del circuito inductor en los sistemas actuales de acoplamiento inductivo en el aire se utiliza una configuración de electrónica de potencia constituida por al menos dos conmutadores estáticos, que son activados alternativamente para la obtención de ondas cuadradas y que son sintonizados a la frecuencia de resonancia de los circuitos acoplados.

Existen diversos puentes resonantes capaces de realizar el control de tensión: el Half-Bridge, el convertidor Push-Pull [7], el Serie Diode Clamped de tres niveles [8], el AC/AC con corriente constante o el clásico puente de onda completa o puente en “H” [9].

Para el desarrollo experimental del proyecto se ha optado por un puente en “H” con control mediante la técnica PWM (Pulse Width Modulation) de dos pulsos ya que es el más utilizado para aplicaciones de potencia y es el que más se ajusta a las necesidades del mismo.

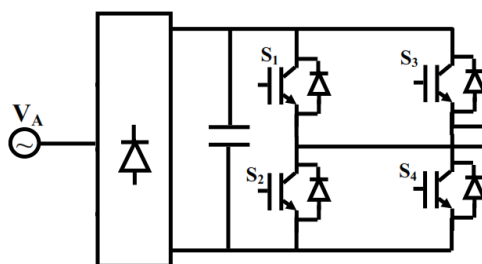


Figura 14. Puente monofásico de onda Completa [4]

4.3.2 Fabricación del sistema de alimentación

Partiremos del circuito electrónico de un puente monofásico de onda completa:

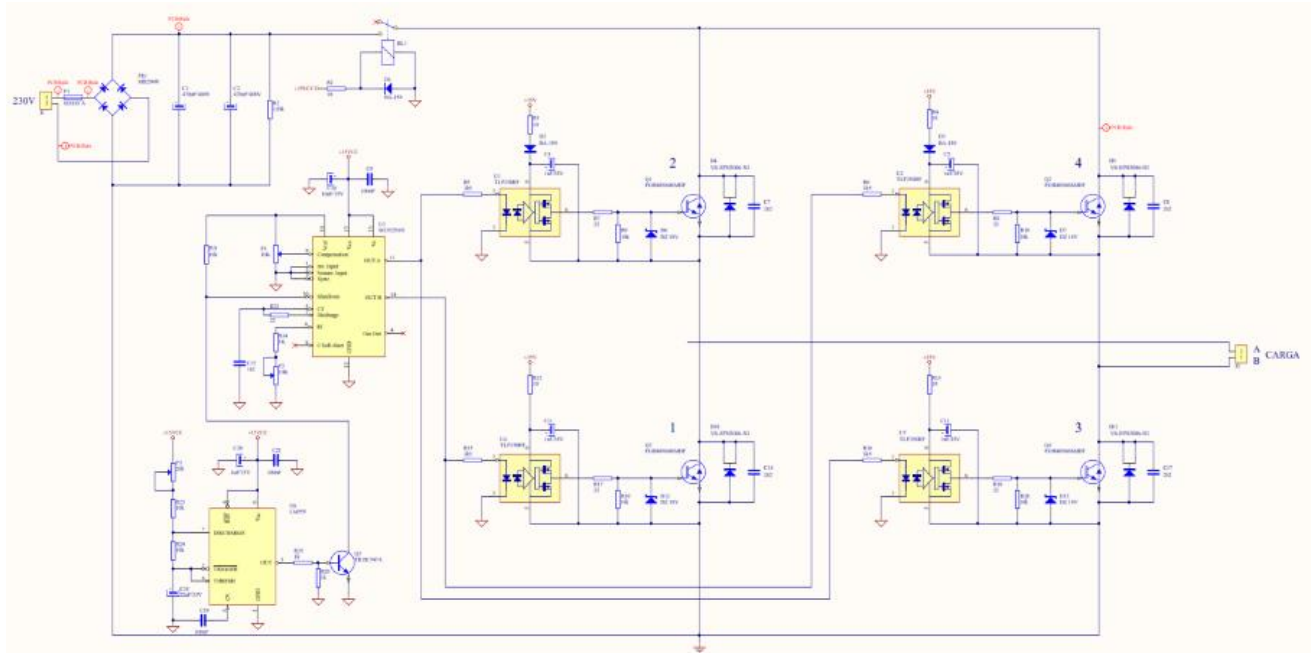


Figura 15. Circuito electrónico puente en H

El circuito se puede dividir en dos partes bien diferenciadas: la parte de control y la parte de potencia. Se trata de dos partes que son alimentadas por separado a diferentes tensiones y cuyas funciones además de complementarias son muy diferentes.

La parte de control se alimenta a 15V DC mediante una fuente de tensión continua. Ésta forma el cerebro del sistema y su parte principal reside en el Controlador PWM de modo de tensión SG3525ANF de 16 pines (U3). Este controlador es el que genera las señales de disparo de las parejas de IGBT's (Q1-Q4,Q2-Q3) modulando el PWM y su frecuencia mediante dos potenciómetros de precisión de 10K (P1, P2). Las dos salidas que genera son dos señales cuadradas, una opuesta a la otra. Cuando la una tiene valor positivo la otra se encuentra en 0 y viceversa.

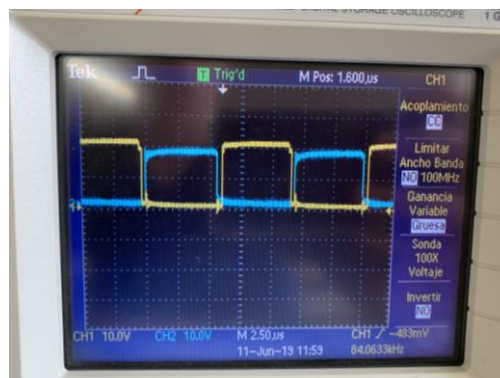


Figura 16. Señales A y B salida Controlador

Estas señales A y B son las que llegan a los Optoacopladores (U1, U2, U4, U5) de cada IGBT. Se trata de fotoacopladores que constan de un diodo de emisión y un fotodetector, el cual detecta cuando se ilumina el diodo y permite la alimentación del mosfet integrado. Este mosfet es el que da la señal final de disparo al IGBT. Este paso intermedio de la señal es necesario ya que la corriente necesaria para activar los IGBT's, aunque es pequeña, no puede ser suministrada directamente por el controlador.

En cuanto a la parte de potencia, ésta se alimenta directamente de la red a 230V AC. Paso seguido se realiza la conversión de tensión alterna (de la red) a tensión continua mediante un puente inversor de onda completa MB254W (PR1) y dos condensadores de rizado de 470uF en paralelo (C1, C2). A la salida de los condensadores obtenemos un bus de tensión continua de 325V. Este bus de continua es el que alimenta a las dos ramas del puente en H.

Cada rama contiene dos interruptores que conmutan de acuerdo a la estrategia de control, cuando una rama se activa la otra se desactiva y viceversa. Cada interruptor está compuesto por un IGBT FGH40N60SMDF (Q1, Q2, Q3, Q4) y un diodo en antiparalelo VS-EPH3006-N3 (D4, D5, D10, D11) encargado de evitar los picos de tensión e intensidad provocados por la conexión y desconexión del IGBT.

Finalmente, una vez conectada al punto medio de cada rama tenemos la salida para la carga. En esta salida podemos conseguir valores de entre 0-230V de tensión, 1kHz-250kHz y potencias de hasta 3kW

Para llevar a cabo la fabricación del sistema de alimentación empezaremos desde cero siguiendo los siguientes pasos:

- Fabricación placa circuito impreso
- Mecanización placa circuito impreso
- Montaje de componentes
- Pruebas finales

4.3.2.1. Fabricación

El primer paso es crear la placa base con las pistas a la que después soldaremos todos los componentes electrónicos. Para ello, utilizaremos el método de la insoladora, mediante el cual transferiremos un circuito impreso en una transparencia a una placa de fibra de vidrio la cual tiene una capa de barniz sensible a la luz UV.

1. Preparación de la placa:

Podemos observar que las dos caras de cobre están cubiertas por una lámina opaca que no deja pasar la luz, esto es así para que la propia luz solar no pueda desensibilizar el barniz e inutilizar la placa. Antes de quitar esa lámina debemos recortar la placa según la medida del circuito que queramos transferir dejando un margen a cada uno de los lados. Una vez recortada debemos limar los laterales para quitar las imperfecciones.



Figura 17. *Placa fotosensible*

2. Preparacion del fotolito e Insolacion:

El fotolito es la transparencia con el esquema eléctrico impreso que nos permite imprimir las zonas que necesitamos y dejar el resto transparentes para que así la luz UV pueda traspasarlo.

Una vez tengamos la placa y el fotolito preparados, los superponemos y los metemos en la insoladora. Hacemos el vacío para que se queden totalmente pegados y procedemos a realizar el proceso de insolacion durante siete minutos.

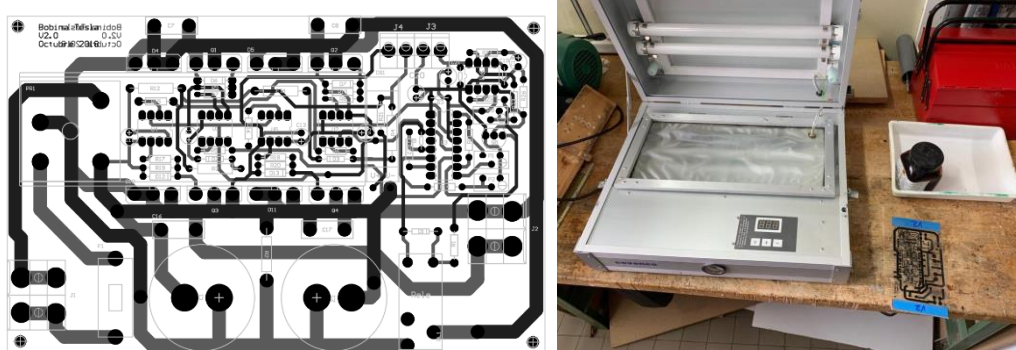


Figura 18. *Fotolito con pistas impresas / Maquina insoladora*

3. Revelado y Atacado:

Para el revelado introducimos la placa en sosa cáustica mezclada con agua para quitar el barniz de la parte que le ha dado la luz UV. Debemos tener cuidado de no exponer la placa a esta solución en exceso ya que el resto de barniz podría comenzar a descomponerse también.

Para el atacado la introduciremos en una mezcla de agua, ácido clorhídrico y dióxido de hidrogeno la cual hace que el cobre que no está cubierto con barniz se disuelva, quedándonos como resultado las pistas eléctricas.



Figura 19. *Proceso de revelado y atacado*

4.3.2.2. Mecanizado

Después de revelar y atacar la placa pasamos al momento de perforarla para poder interconectar la parte delantera con la trasera y soldar los componentes electrónicos. Utilizando la Dremel taladraremos los agujeros con los diámetros de broca correspondientes a cada componente.



Figura 20. *Proceso de mecanizado*

4.3.2.3. Montaje de componentes

Este es el paso final y más importante del proceso de fabricación de la fuente de alimentación ya que de él dependerá en mayor medida el buen funcionamiento. En el soldaremos todos los componentes electrónicos necesarios yendo desde los más pequeños a los más grandes. Se debe tener cuidado con la polaridad de los componentes como condensadores o diodos y ser muy meticuloso a la hora de soldar los opto acoplados ya que podríamos acabar cortocircuitando los pines.

Por ultimo acoplaremos el disipador de calor a los IGBT's y al puente rectificador lo que nos permitirá trasferir mucha más potencia sin que haya sobrecalentamiento.

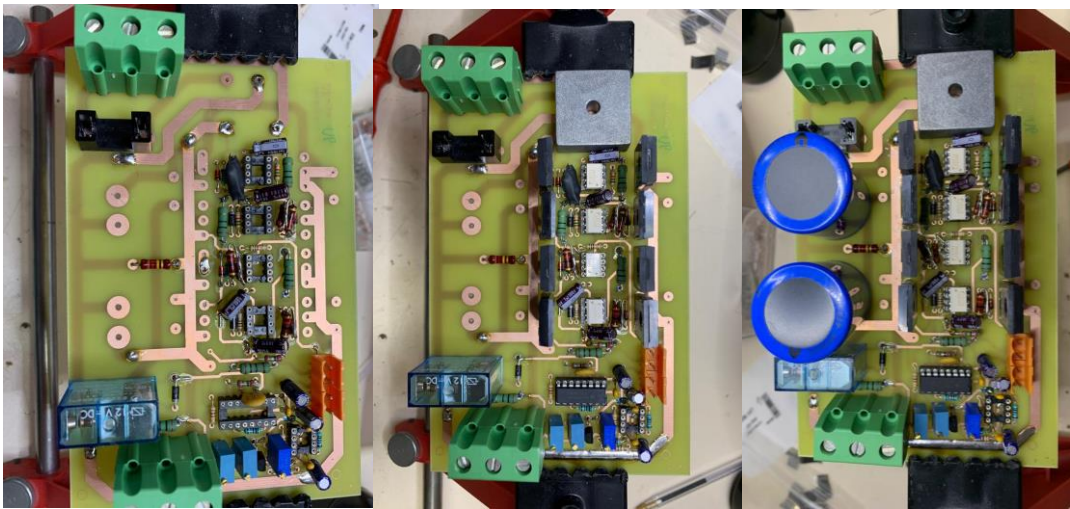


Figura 21. Proceso de soldadura de los componentes

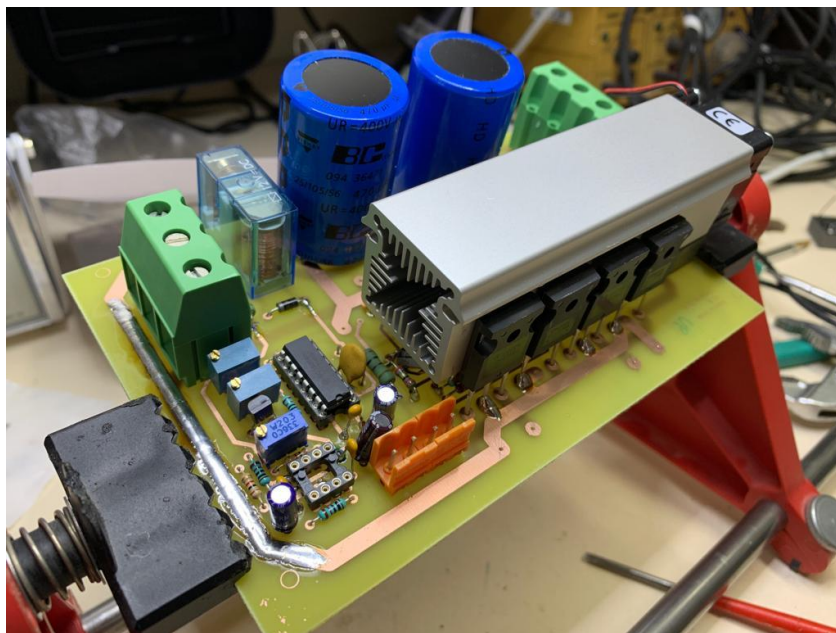


Figura 22. Placa terminada

4.3.2.4. Pruebas finales

En este proceso conectaremos la placa a la red eléctrica mediante un autotransformador para alimentar la parte de potencia y a una fuente de tensión DC de 15V para la parte de control. A la salida conectaremos una carga resistiva y comprobaremos que las diferentes señales y niveles de tensión son los correctos además de comprobar que la regulación en frecuencia y en el DutyCycle funciona correctamente.

Por motivos de seguridad y protección de la placa, se le ha añadido una placa adicional. Su función es la de retrasar la conexión de la alimentación de la parte de potencia para así evitar el pico de corriente que se produce al arrancar el sistema.

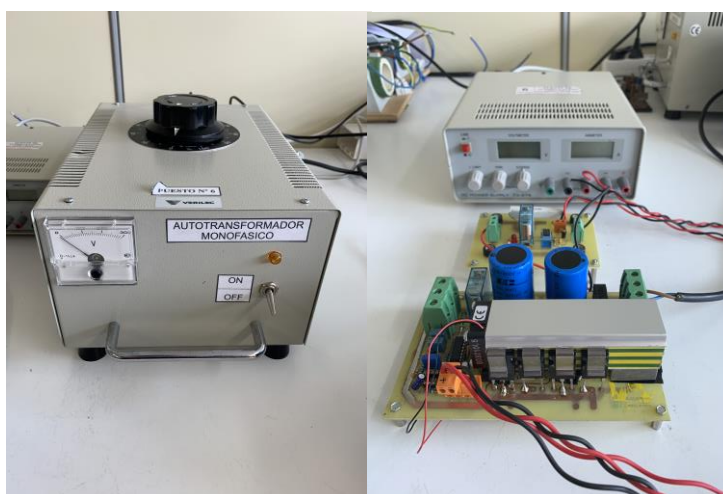


Figura 23. Autotransformador monofásico / Fuente de tensión DC

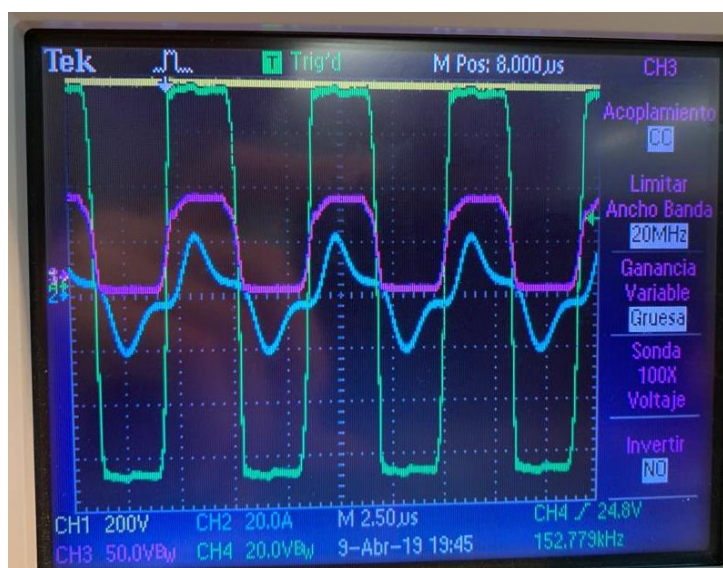


Figura 24. Bus de continua (amarillo) – Tensión de salida (verde) – Señal disparo IGBT (morado) – Intensidad salida (azul)

4.4 SISTEMA DE TRANSFERENCIA CONSTRUIDO

4.4.1 Bobinas

La parte más importante de este sistema es la correcta elección de las bobinas y de los condensadores, ya que son dos componentes que van intrínsecamente ligados. En primer lugar partiremos de la elección de las bobinas que son las que actuarán de antena para la transferencia de energía, los que nos impondrán las condiciones de diseño. Sus parámetros de sección y número de espiras los hemos obtenido como solución en la simulación de Matlab. Posteriormente, con los valores reales de inductancia e inductancia mutua que hemos obtenido tras fabricarlas volveremos a simular para obtener los valores de condensadores definitivos.

La forma del campo magnético y la geometría de las líneas de campo dependen directamente de la propia geometría de las bobinas así como de sus inductancias. En nuestro caso, al tratarse de un sistema de alimentación específico para un producto concreto nos hemos tenido que ceñir a las medidas y formas del producto.

Tras analizar las diferentes opciones se ha optado por la incorporación de la bobina del secundario en la zona destinada a la iluminación led (circunferencia roja). Es una ranura bastante amplia situada en la zona exterior del patinete, lo que nos permitirá posteriormente diseñar un soporte, el cual contendrá la bobina del primario, y alinear perfectamente las dos bobinas. Su geometría circular facilitará el diseño y la elaboración de las bobinas. Además, ofrece una relación óptima entre el área encerrada por el conductor y el perímetro requerido, lo que reduce las resistencias parasitas optimizando el circuito.



Figura 25. *Patinete escalado*

Los valores de sección y número de espiras teóricos eran 54 espiras de 0.3mm² para el primario y 11 espiras de 1.1 mm² para el secundario. Al tratarse de secciones muy concretas y no comerciales, se ha optado por la fabricación exproceso de secciones similares quedando 0.7mm² para el primario y 1.06mm² para el secundario. Para su fabricación se ha utilizado hilo de Litz multifilar formado por hilos independientes de 0.3mm de diámetro.

	Medidos
N1_S1	54 espiras de 0.7 mm ²
N2_S2	11 espiras de 1.06 mm ²
L1[H]	2.216e-03
L2[H]	100e-6
R1 [Ω]	25.50
R2 [Ω]	1.17

Tabla 3. Valores bobinas construidas



Figura 26. Bobinas primario y secundario construidas

Tras su fabricación y después de soldarle los terminales de conexión, se ha procedido a medir sus coeficientes de autoinducción, sus resistencias y su coeficiente de inducción mutua mediante el Wayne Kerr, obteniéndose los siguientes resultados.

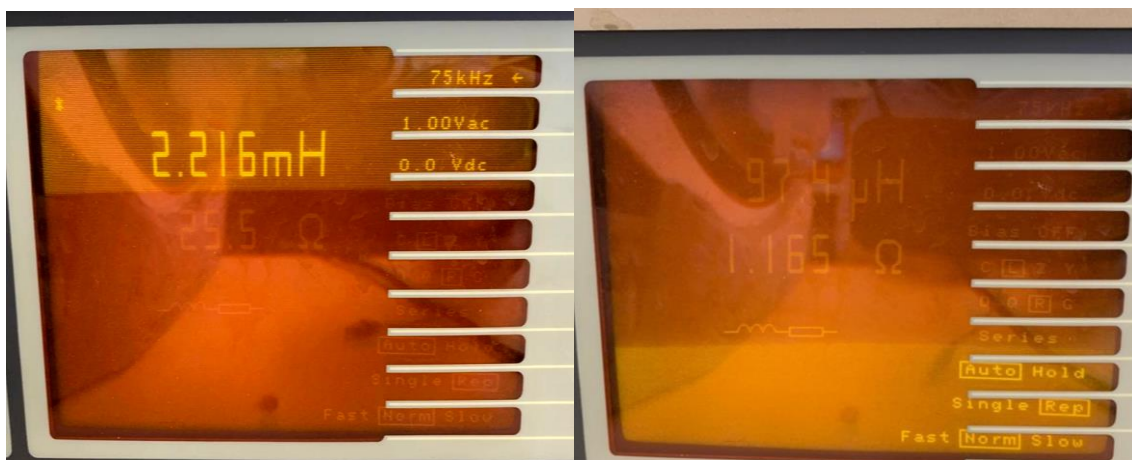
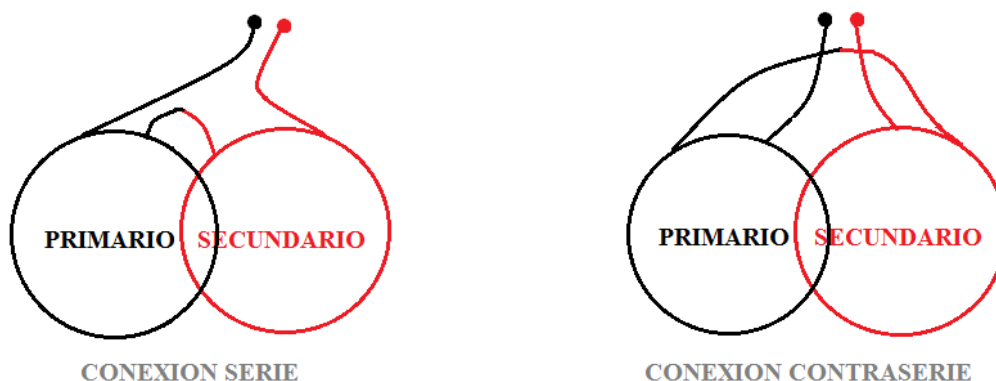


Figura 27. Resultados Wayne Ker



Figura 28. Montaje medición L y R bobinas

Para calcular el coeficiente de inducción mutua entre las bobinas realizaremos las siguientes conexiones y volveremos a medir sus valores de L con el Wayne Kerr.



Los valores obtenidos en cada una de las medidas se corresponden a:

SERIE: $L_1 + L_2 + 2M = 2,866 \text{ mH}$

CONTRASERIE: $L_1 + L_2 - 2M = 1,781 \text{ mH}$

Finalmente para obtener el valor de M basta con restar las dos ecuaciones dándonos como resultado:

$$M = 0,271 \text{ mH}$$

4.4.2 Condensadores

La función principal de los condensadores es la de sintonizar cada una de las etapas compensando la impedancia de carácter inductivo producido por las bobinas. Al tener que trabajar en resonancia, las tensiones que soportan estos condensadores son del orden de 1000 voltios, siendo una característica fundamental para la elección del mismo. Además la sintonización del circuito debe ser precisa y por tanto la tolerancia y la resistencia al envejecimiento son características deseables.

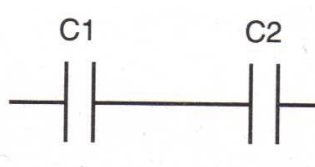
No es común que existan condensadores comerciales con las características deseadas para esta aplicación, ya que no son frecuentes en el campo de la electrónica convencional. Por lo que optaremos por la opción de utilizar varios condensadores para ajustarnos lo suficiente a las especificaciones. Además si se realiza una conexión en serie, se logra un divisor de tensión, repartiendo los picos de tensión máxima entre los diferentes condensadores y reduciendo sus requisitos de tensión máxima.

La capacidad de cada condensador esta impuesta por la inductancia de la bobina de su misma etapa y la frecuencia de resonancia 85 kHz. Los valores teóricos son:

	Teórico
C1[F]	1,6e-9
C2[F]	3,90E-08
Frec.[kHz]	85

Tabla 4. Valores teóricos condensadores

Para conseguir estas capacidades hemos tenido que realizar asociaciones en serie de condensadores con los valores comerciales dando lugar a los siguientes esquemas.

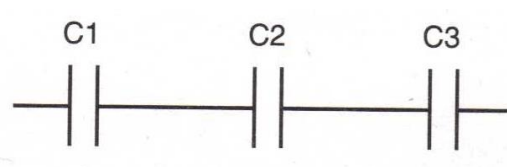


PRIMARIO

$$C1=2.2\text{nF}$$

$$C2=6.8\text{nF}$$

$$C_{\text{Primario}} = \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2} = 1.66\text{nF}$$



SECUNDARIO

$$C1=120\text{nF}$$

$$C2=120\text{nF}$$

$$C3=120\text{nF}$$

$$C_{\text{Secundario}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} = 40\text{nF}$$

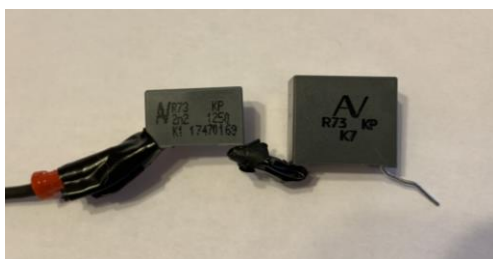


Figura 29. Condensadores primario

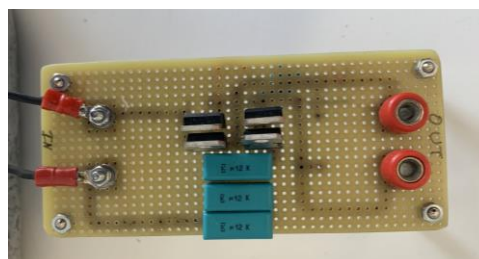


Figura 30. Condensadores secundario

4.5 PRUEBAS EXPERIMENTALES

Para finalizar solo nos queda juntar todas las partes que hemos fabricado hasta ahora, conexas y realizar las pruebas experimentales.

Para realizar las pruebas usaremos como carga dos resistencias de potencia, una de 100Ω y otra de 47Ω , en paralelo para conseguir 33Ω en total. Estas resistencias nos permitirán simular la batería del patinete.



Figura 31. Resistencias de carga

Asimismo conectaremos la entrada de tensión alterna mediante un autotransformador lo que nos permitirá ir subiendo la tensión progresivamente e ir viendo cómo se comporta el sistema.

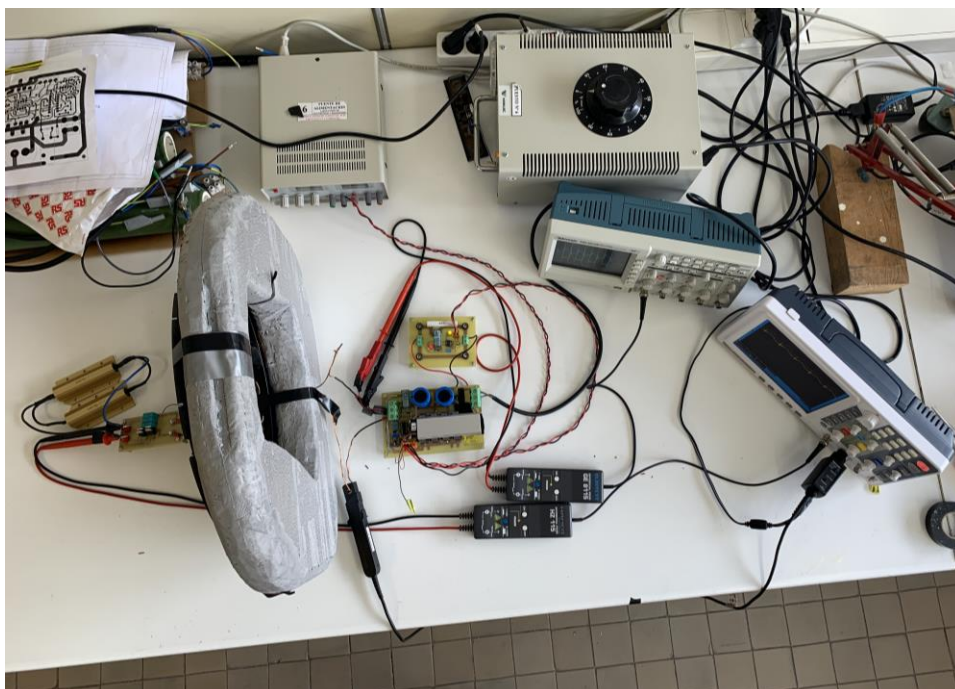


Figura 32. Sistema completo montado

4.5.1 BARRIDO EN FRECUENCIA

La primera comprobación que vamos a hacer es comprobar que la frecuencia de resonancia que nos sale en la simulación corresponde a la que tenemos en realidad. Según la simulación sabemos que en torno a la frecuencia de resonancia, 85kHz, tenemos una zona plana, lo que nos viene a decir que la variación de frecuencia no nos repercutirá en los demás parámetros. Para ello hemos realizado el siguiente comparativo a diferentes frecuencias:

84kHz		
V primario	V secundario	Potencia
10,00	1,20	0,05
20,00	2,80	0,26
30,00	4,50	0,68
40,00	5,80	1,12
50,00	7,50	1,88
85kHz		
V primario	V secundario	Potencia
10,00	1,20	0,05
20,00	2,70	0,24
30,00	4,20	0,59
40,00	5,90	1,16
50,00	7,50	1,88
86kHz		
V primario	V secundario	Potencia
10,00	1,20	0,05
20,00	2,80	0,26
30,00	4,40	0,65
40,00	6,00	1,20
50,00	7,60	1,93
87kHz		
V primario	V secundario	Potencia
10,00	1,20	0,05
20,00	2,90	0,28
30,00	4,30	0,62
40,00	6,00	1,20
50,00	7,60	1,93

Tabla 5. Comparación parámetros a diferentes frecuencias

Como conclusión a esta prueba experimental se puede observar que los parámetros de tensión de secundario y potencia no cambian si variamos la frecuencia en torno a la frecuencia de resonancia de la simulación.

4.5.2 BARRIDO EN TENSION

La segunda comprobación que vamos a hacer es la de ir subiendo la tensión de alimentación y vamos a ver cómo se comportan las intensidades de primario y secundario y la tensión de secundario.

En las siguientes figuras se representan las ondas obtenidas del osciloscopio de tensiones y corrientes a la entrada del primario y a la salida del rectificador.

85kHz				
V1	I1	V2	I2	P2
20	0,106	2,5	0,076	0,19
40	0,16	5,2	0,16	0,832
60	0,15	8	0,24	1,92
80	0,23	10,5	0,33	3,465
100	0,28	13,5	0,41	5,535
120	0,32	16	0,49	7,84
140	0,37	20	0,56	11,2
160	0,42	24	0,63	15,12
180	0,47	28	0,7	19,6
200	0,52	32	0,77	24,64
220	0,57	36	0,84	30,24

Tabla 6 . Resultados barrido de tensión

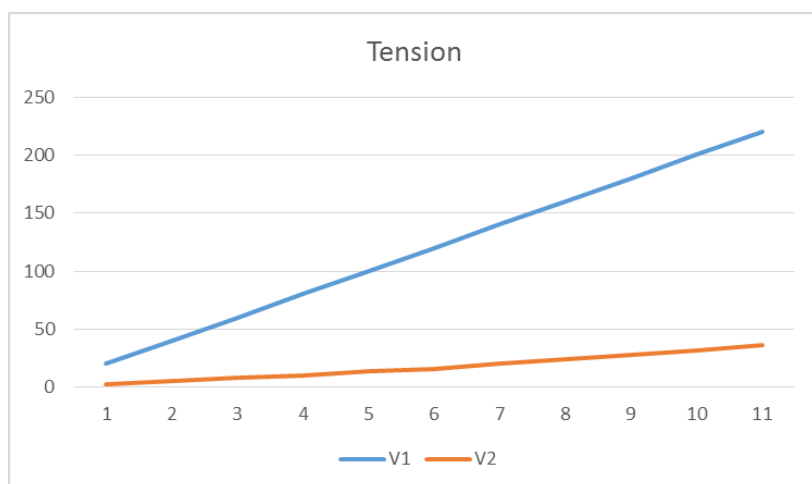


Figura 33. *Grafica Tensión primario y secundario*

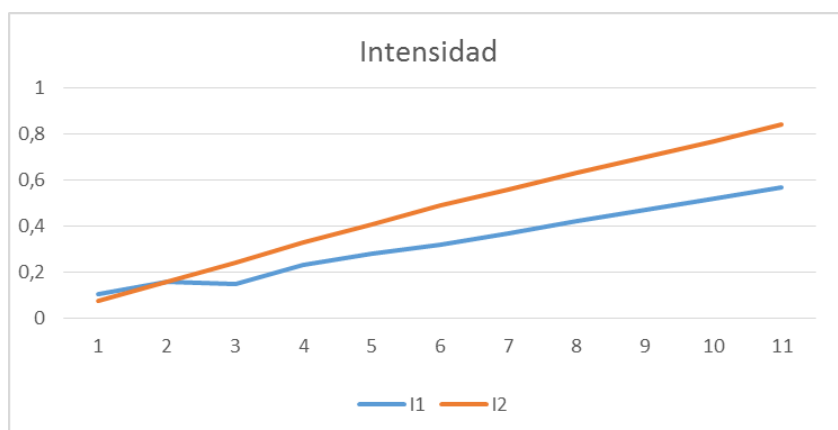


Figura 34. *Grafica Intensidad primario y secundario*

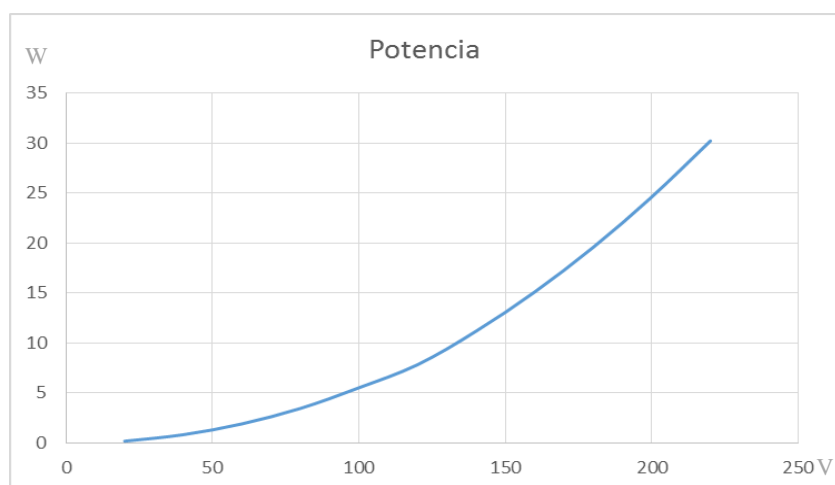


Figura 35. *Grafica potencia (W) / Tensión primario (V)*

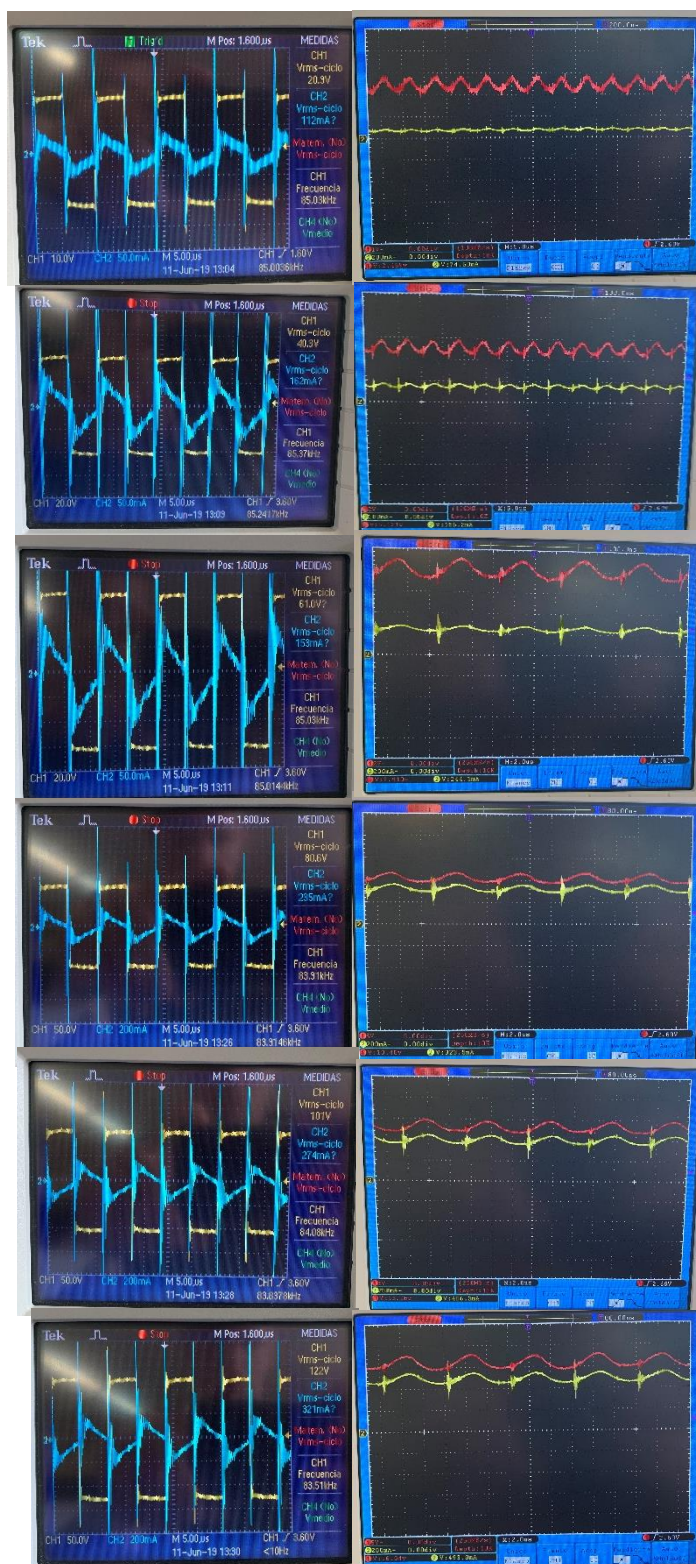


Figura 36. Señales tensión-intensidad del primario y secundario

5 CONCLUSIONES

Desarrollar desde cero un sistema de carga inalámbrica, implantarlo en un producto real y ver cómo llega a funcionar ha sido todo un reto. He podido comprobar de primera mano lo difícil que es llevar a la realidad lo que pone en un papel o en un programa de simulación. Cuando lo diseñas todo funciona a la perfección, todo encaja según lo previsto y si hay algún problema es fácil solventarlo. Al llevar a la realidad ese proyecto te das cuenta de que cualquier cosa por pequeña que sea tiene sus complicaciones. Desde conseguir el hilo de Litz con las características necesarias, pasando por soldar las pequeñas pistas y pines de la placa electrónica e incluso realizando una simple impresión 3D.

Todo el proceso ha tenido sus logros y sus fracasos. Por ejemplo comprobar que al acabar la placa de potencia y probarla no funciona, fue inicialmente una decepción pero eso me llevo a aprender a repararla y finalmente hacerla funcionar, lo que fue un logro aún más grande. Tras muchos altibajos a lo largo de estos meses ver que el sistema es capaz de transferir energía ha sido lo más gratificante.

La implementación definitiva de este tipo de cargador en el mercado será una realidad en pocos años. Cada vez son más los productos que llevan de serie este sistema como ya se ha comentado en la introducción, por esta razón estoy satisfecho con el trabajo realizado ya que supone una innovación aun no desarrollada para este producto en concreto y que seguramente en el futuro se podrá ver implementada en el mercado.

6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] <http://es-es.segway.com/>
- [2] <https://www.hibridosyelectricos.com>
- [3] Boys John Talbot, “Inductive Power Transfer Across and extended gap”, NZ Patent N° 0314754, 1997.
- [4] J. L. Villa Gazulla, “Sistemas De Transferencia De Energia Para Vehiculos Eléctricos Mediante Acoplamiento Inductivo”, 2009
- [5] Z. Sears and F. Young, “Física universitaria, 12a. edición, ed.”
- [6] O.H. Stielau; G.A. Covic; “Design of loosely coupled inductive power transfer systems” in Proc. 2000 Int. Conf. Power System Technology, vol. 1, Dec.2000, pp. 85-90.
- [7] A.P.Hu; J.T. Boys. “ Frequency Analysis and Computation of a Current-fed resonant Converter for ICPT Power Supplies”
- [8] L.M. Tolbert; F.Z. Peng; T. Cunyngham. “Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles”. IEEE Transactions on Industrial Electronics; vol.49; no.5; October 2002; pp. 10581064.
- [9] Nasser H. Kutkut; Deepak M. Divan; D.W. Novotny and R. Marion. “Design Considerations and Topology Selection for a 120 kW IGBT Converter for EV Fast Charging”. IEEE Transactions on Power Electronics; vol.13; no.1; January 1998; pp. 169-178.